

**С. Ф. АРТЮХ**, д-р техн. наук; профессор УИПА

**А. Л. КУХАРЕВ**, инж.; ОАО «Стахановский завод ферросплавов»

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ФЕРРОСПЛАВНЫХ ПЕЧЕЙ**

Розроблена імітаційна модель системи електроживлення ферросплавних печей у середовищі Matlab/Simulink, приведені алгоритми та програмні модулі, що дозволяють автоматизувати процес розрахунку та аналізу їх стаціонарних і динамічних режимів. Імітаційна модель вміщує підмоделі електропічних трансформаторів та ферросплавної печі з нелінійними моделями дуг змінного струму. За допомогою створених моделей виконані розрахунки електричних характеристик систем електроживлення ферросплавних печей, що виплавляють феросиліцій та кремній.

The imitative model of power supplies systems of the submerged-arc furnaces for production of silicon metal and ferrosilicon is developed. The algorithms and program modules allowing automating procedure of account and the analysis of their stationary and dynamic modes are offered. The imitative model includes submodels of furnaces transformers and internal resistances of the furnace and nonlinear models of AC arc. Electrical characteristics of the power supplies systems are made.

Современные технологии производства сталей требуют наличия различных видов ферросплавов, используемых в металлургическом процессе для раскисления и придания легирующих свойств выплавляемому металлу. Большинство ферросплавов производят электротермическим способом в специальных ферросплавных электропечах, единичные мощности которых на Украине достигли 80 МВА [1]. В отличие от дуговых сталеплавильных печей, в ферросплавных печах преобразование электрической энергии в тепловую осуществляется не только в электрической дуге, но и в зонах с различным агрегатным состоянием материалов: в твердой и размягченной вследствие нагрева шихте, а также в жидком расплаве конечного продукта и шлака.

Производительность печей и другие технико-экономические показатели их работы во многом определяются электрическим режимом их систем электропитания (СЭП). Для повышения эффективности их функционирования широко используются методы математического моделирования, при этом в течение длительного времени модели ферросплавных печей и СЭП рассматривались как два независимых направления. Так, модели ферросплавных печей, как правило, представлялись в виде схемы замещения, в которой отражалась структура рабочего пространства ванны печи, как элемента электрической цепи [2, 3]. В то же время в моделях СЭП [4] подэлектродное строение ферросплавной печи не учитывалось. Такой подход не всегда давал возможность получить желаемый результат в полном объеме, т.к. в случае его использования не учитывается вся гамма взаимосвязей и взаимных влияний СЭП и ферросплавных печей. В

частности, переключение ступеней напряжения в электропечных трансформаторах приводит не только к изменению его вторичного напряжения и эквивалентного сопротивления печного контура, но и к изменению мощности печи, условий горения дуг, а это в свою очередь влияет на производительность и удельный расход электроэнергии печи. Изменение электрических параметров печи также определяет изменение потерь электроэнергии в СЭП и в целом величину подводимого к печи напряжения и т.д. Поэтому при решении поставленной выше проблемы ферросплавную печь и СЭП необходимо рассматривать как единую взаимосвязанную динамическую систему. Для этого перспективным представляется метод имитационного моделирования в среде Matlab/Simulink, с помощью которого можно удобно и наглядно анализировать их стационарные и динамические режимы сложных систем [5, 6] При этом анализ литературных источников показал, что созданию имитационных моделей СЭП ферросплавных печей уделено недостаточно внимания.

Целью данной статьи является разработка имитационных моделей СЭП ферросплавных печей и компонентов алгоритмического и программного обеспечения в среде Matlab/Simulink для исследования стационарных и динамических режимов их работы. В общем виде такая модель должна отражать основные энергетические процессы, протекающие в ферросплавной печи и позволять оценивать влияние на ход этих процессов параметров их СЭП. В модель печи должна быть включена подмодель электрической дуги, позволяющая определять протекающие в дуге термодинамические и электродинамические процессы и производить анализ распределения электроэнергии в ванне печи.

В данной работе в качестве объектов моделирования приняты наиболее распространенные СЭП трехэлектродных ферросплавных печей, состоящие из трех однофазных электропечных трансформаторных агрегатов, каждый из которых выполнен в виде двух электромагнитных единиц- главного и вольтодобавочного трансформаторов, причем в цепь последнего включена конденсаторная батарея продольной компенсации реактивной мощности (УПК). В таких СЭП как правило обмотки ВН и НН ЭПТ соединяются в «треугольник», причем соединение обмоток НН в «треугольник» осуществляется на электродах печи. Для поддержания электрического режима печей в заданных параметрах электропечные трансформаторы оснащаются устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).

Предложенная модель СЭП представляет собой электрическую цепь, включающую электропечные трансформаторы, вторичный токоподвод (короткую сеть), электроды и ванну печи. При этом предполагается, что технологический процесс является непрерывным, а режим работы печи стационарным с четкими границами тепловых зон и квазистационарным характером протекания процессов в зонах. Электрическая цепь короткой сети и электродов печи представляется совокупностью линейных активно-

индуктивных сопротивлений, при этом электромагнитная связь между фазами короткой сети не учитывается. Подэлектродные рабочие зоны печи представляются в виде последовательного соединения сопротивлений области электрической дуги и области расплава, а также шунтирующим дугу и расплав сопротивлением области шихтовой проводимости, а электрическая дуга учитывается динамическим активным сопротивлением. При построении имитационной модели СЭП в Matlab/Simulink использовались существующие блоки электромагнитных элементов из библиотеки SimPowerSystems, а имитационная модель ферросплавной печи разрабатывалась на основе математической модели электрической цепи с шунтированной дугой переменного тока, которую можно записать в следующем виде [7,8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\text{сэп}}(t) = i_{\text{эi}} r_{\text{ки}} + L_{\text{ки}} \frac{di_{\text{эi}}}{dt} + i_{\text{ди}} r_{\text{ди}}(t) + i_{\text{ди}} r_{\text{пи}} + u_0; \\ u_{\text{сэп}}(t) = i_{\text{эi}} r_{\text{ки}} + L_{\text{ки}} \frac{di_{\text{эi}}}{dt} + i_{\text{шиi}} r_{\text{шиi}} + u_0; \\ i_{\text{эi}} = i_{\text{шиi}} + i_{\text{ди}}; \\ \sum_{i=1}^3 i_{\text{эi}} = 0, \end{array} \right.$$

где  $u_{\text{сэп}}(t)$ - выходное напряжение СЭП, подводимое к печи;

$i_{\text{эi}}, i_{\text{ди}}, i_{\text{шиi}}$  – токи, проходящие по электроду, дуге и шихте;

$r_{\text{ки}}, L_{\text{ки}}$ - активное сопротивление потерь и индуктивность ванны печи;

$r_{\text{пи}}, r_{\text{шиi}}$ - внутривспечные сопротивления расплава и шихты.

$r_{\text{д}}(t)$ - динамическое сопротивление дугового разряда.

$u_0$ - мгновенное значение напряжения между нулевыми точками печи и печного трансформатора.

$i = 1, 2, 3$  – номер фазной цепи.

Параметры сопротивлений шихты и расплава определялись по методикам, приведенным в [9]. Для определения динамического сопротивления дугового разряда нами была усовершенствована математическая модель дуги, основанная на численно-аналитическом решении уравнения баланса энергии столба дуги. Данная модель будет представлена авторами в последующих работах. Процедура совместного решения модели электрической дуги переменного тока в среде Matlab/Simulink основана на том, что в каждом временном шаге вычисляемое значение  $r_{\text{ди}}$  вставляется в данное уравнение цепи и далее простой итерацией

получается зависимость  $i_{д}(t)$ , а также временные зависимости других вычисляемых параметров.

Предложенная модель СЭП ферросплавных печей показана на рис. 1. Для удобства восприятия модели пиктограммы блоков резистора и индуктивности в библиотеке SimPowerSystems изменены в соответствии с условными графическими обозначениями этих элементов, принятых в СНГ. Эти и другие полезные советы по моделированию в системе Matlab приведены на сайте [matlab.exponenta.ru](http://matlab.exponenta.ru).

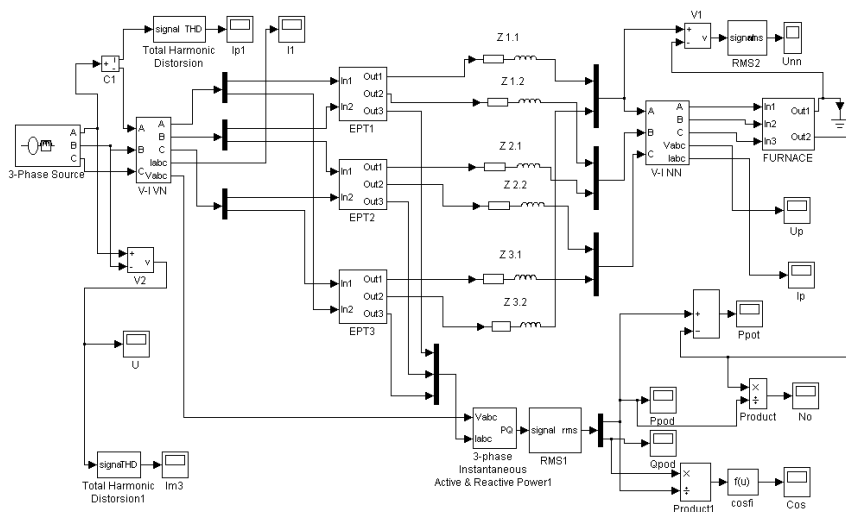


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели системы электропитания ферросплавной печи

Структура этой модели включает следующие компоненты:

блок 3-Phase Source, включающий источник напряжения и последовательное активно-индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения;

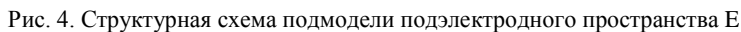
подмодели EPT 1...3, которые моделируют электропечные трансформаторные агрегаты с УИК (блоки Saturable transformer и Series RLC Branch) (рис. 2);

блоки Z1.1-Z3.2 (Series RLC Branch) определяющие собой активно-индуктивные сопротивления короткой сети от каждого трансформатора;

подмодель ферросплавной печи FURNACE (рис. 3), включающая подмодели подэлектродных областей E1...3 (рис. 4), которые в свою очередь содержат сопротивления каждого электрода Z1-Z3, шихтовой области  $r_{ш}$  и

The diagram illustrates a power converter system. It features two saturable transformers, **Saturable Transformer1** and **Saturable Transformer2**. **Saturable Transformer1** has two primary windings: one connected to input **In1** (labeled 1) through a capacitor **C1**, and another connected to input **In2** (labeled 2). Its secondary winding is connected to a load **I1** and a capacitor **C3**. **Saturable Transformer2** has a primary winding connected to the output of **C3** and a secondary winding connected to a load **I2** and a **Series RLC Branch2**. The **Series RLC Branch2** consists of a resistor, an inductor, and a capacitor in series, followed by a capacitor **C2**. The output of **C2** is connected to a load **I3** and a voltage source **V1**. The voltage source **V1** is connected to a load **Un**. The system also includes three output ports: **Out1** (labeled 1), **Out2** (labeled 2), and **Out3** (labeled 3).

180



Параллельно источнику тока (Controlled Current Source) также подключен развязывающий резистор  $R$ , к зажимам которого подключены входной и выходной порты данной подмодели.

Следует отметить, что важным этапом моделирования электромагнитных процессов в СЭП является выбор метода численного интегрирования. В нашем случае наиболее эффективным выявился многшаговый двухэтапный метод ode 23tb (Stiff/TR-BDF2), основанный на неявной формуле Рунге-

Кутта, который обеспечивает устойчивость вычислительного процесса при необходимом уровне точности результата.

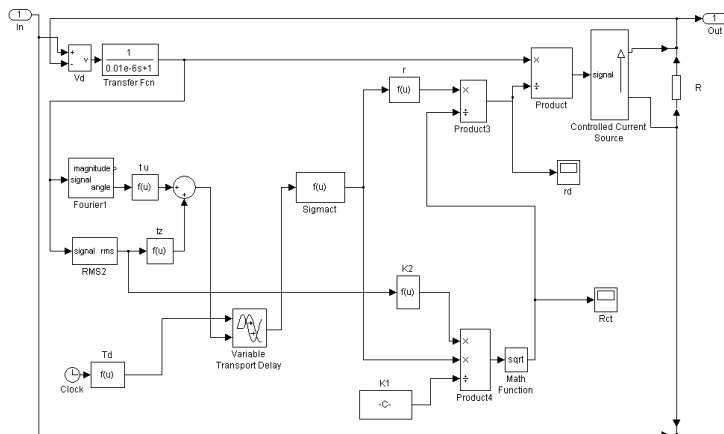
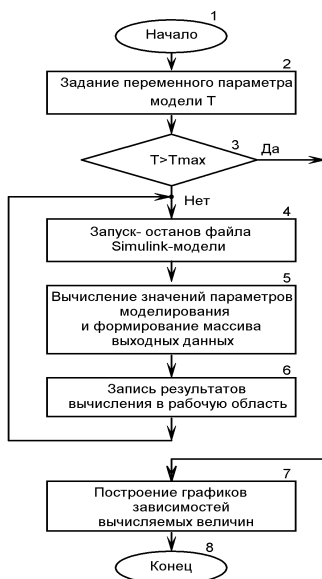


Рис. 5. Структурная схема подмодели дуги переменного тока ARC

При проведении анализа электромагнитных процессов в СЭП производится расчет и анализ большого массива числовых данных, а также построение зависимостей различных величин. Эту задачу в пакете Matlab можно решить с помощью М-сценария, оформляемого в виде специального программного модуля. Разработанная с учетом работ [5, 6] блок-схема алгоритма такого программного модуля, приведена на рис. 6 а. На рисунке 6 б в качестве примера приведен фрагмент текста программного модуля для расчета электрических характеристик СЭП с учетом параметров электрических дуг. Во втором блоке приведенного алгоритма задается переменный параметр модели Т, диапазон и шаг изменения которого определяется в следующем блоке. Четвертый блок осуществляет циклический запуск файла имитационной модели, каждый раз с различными значениями Т. В пятом блоке осуществляется выбор и расчет необходимых (действующих, максимальных и др.) значений параметров моделирования, а также формирование массива выходных данных. Далее осуществляется запись результатов моделирования в рабочую область программы (блок 6). В блоке 7 выполняется визуализация зависимостей расчетных величин в виде формирования графиков.

Приведенный на рис. 6 а алгоритм является универсальным, по которому могут составляться программные модули для исследования различных процессов в СЭП. При этом переменным параметром модели Т может быть подводимое напряжение, сопротивление элементов СЭП и др.



а)

```

clc
clear
i=1
for T=0.01:0.1:1.2
    sim SEP
    %Вычисление радиуса столба дуги
    j=3000
    size(Rs)
    n=ans(:,1)
    P=[Rs(j:n,1),Rs(j:n,2)]
    Rm=0.00001
    h=n-j
    for ii=1:h
        P(ii:ii,2)
        if Rm<ans
            Rm=ans
            Rmax(ii)=Rm
        end
    end
    % Вычисление подводимой мощности
    size(Ppod)
    m8=ans(:,1)
    P_pod(ii)=Ppod(m8:m8,2)
    . . .
    i=i+1
end
plot(U_nn,P_pod/27e6,U_rm,I_p/15e5,
      U_rm,C_o,U_nn,N_o)
  
```

б)

Рис. 6. а) - блок-схема программного модуля для расчета электромагнитных процессов, б) –фрагмент текста программного модуля

Для апробации модели и решения ряда практических задач, связанных с выбором рациональных электрических режимов СЭП с учетом распределения электрической мощности в подэлектродных рабочих зонах, нами произведено моделирование электромагнитных процессов в СЭП ферросплавных печей ОКБ-613 мощностью 27 МВА с электропечными трансформаторами ЭОЦНК-21000/10. Параметры схемы замещения ванны печи, вводимые в модель, были рассчитаны для условий выплавки кремния или высокопроцентных марок ферросилиция. На рис. 7 представлены моделируемые временные зависимости тока и напряжения печи, а на рис. 8 приведены электрические характеристики СЭП при регулировании выходного напряжения электропечными трансформаторами. При проведении данных расчетов сопротивления  $r_{pi}$ ,  $r_{ши}$  принимались условно постоянными.

Как видно, кривые тока и напряжения печи несколько отличаются от синусоидальных. Это обусловлено тем, что при принятых условиях моделирования суммарная мощность дугового разряда в печи составляет ~ 50% от всей мощности СЭП  $P_{сэп}$ . С увеличением напряжения  $U_{сэп}$  общая подводимая мощность  $P_{сэп}$  увеличивается, а КПД и  $\cos\phi$  снижаются. При этом



большая часть мощности печи перераспределяется из зоны шихты в зону дуги и расплава. Причиной указанных особенностей является нелинейность электрической дуги, сопротивление которой ( $r_d$ ) с ростом напряжения уменьшается, а рост тока дуги происходит за счет увеличения радиуса ее токопроводящего канала  $R_d$ . Полученные результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными [7, 8].

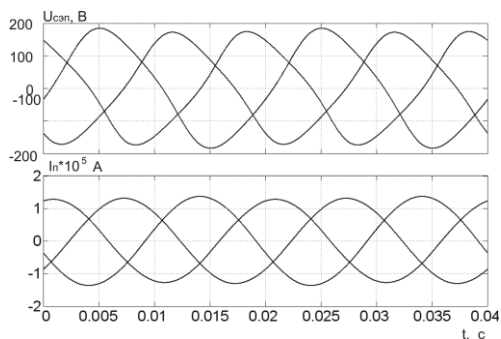


Рис. 7. Моделируемые временные зависимости тока и напряжения ферросплавной печи

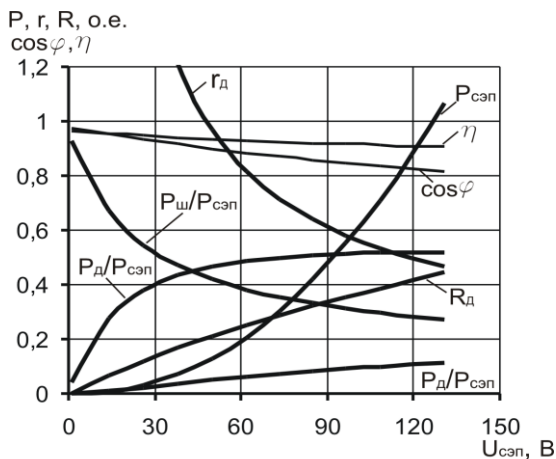


Рис. 8. Электрические характеристики СЭП ферросплавных печей при регулировании напряжения электропечными трансформаторами

Таким образом, полученные модели позволяют оперативно получать информацию о параметрах ферросплавных печей и их СЭП, что весьма важно при их эксплуатации. Приведенные модели с некоторой модификацией также использовались нами для исследования коммутационных процессов в

электropечных трансформаторах [11], при этом отмечена приемлемая сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных.

**Выводы.** Разработанная имитационная модель СЭП ферросплавных печей позволяет производить расчеты стационарных и динамических, симметричных и несимметричных режимов СЭП, с учетом энергетических процессов, протекающих в ваннах ферросплавных печей, что позволяет оперативно корректировать их электрические режимы с целью достижения наилучших технико-экономических показателей. Использование предложенного алгоритмического и программного обеспечения позволяет значительно повысить эффективность вычислительной процедуры, а также сократить временные затраты. Уточнены расчетные характеристики СЭП ферросплавных печей с учетом распределения электроэнергии в их подэлектродных рабочих зонах в зависимости от уровня выходного напряжения СЭП. На основе предложенных моделей были усовершенствованы методики расчета электрических режимов СЭП ферросплавных печей, которые применяются на ОАО «Стахановском заводе ферросплавов». При этом представляется перспективным использование полученных моделей в составе АСУТП для выплавки ферросилиция.

**Список литературы:** 1. Гасик М. И., Ганцеровский О. Г. Овчарук А. М., Рогачев И. П. Ферросплавы Украины-2000.-Днепропетровск: «Системные технологии», 2001 г. -143 с. 2. Воробьев В. П., Сивцов А. В. Строение рабочего пространства и схемы замещения полезной электрической нагрузки ферросплавных печей. В кн.: Компьютерное моделирование оптимизация технологических процессов электротермических производств. Сб. трудов научно-технического совещания «Электротермия -2000». Под ред. Удалова Ю. П. СПбГТИ(ТУ). СПб., 2000 г. с. 227-232. 3. Арменский С. В. Разработка математической модели подэлектродного пространства руднотермических печей. Дис.... канд. техн. наук: 05.13.18. – Новосибирск, 2002 г.- 379 с. 4. Данцис Я. Б., Жилов Г. М. Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий.- Л.: Энергия, 1980-176 с. 5. Халиков В. А., Паханьян В. М., Шатан О. Ф. Имитационное моделирование и коррекция вольтамперных характеристик источников тока сварочной дуги//Техническая электродинамика. -2006. №3. с. 18-25. 6. Халиков В. А., Можаровский А. Г. Методология применения программного пакета MATLAB при моделировании и исследовании электромагнитных процессов в трансформаторно-ключевых исполнительных структурах. -К.: ИЭД НАНУ, 2001.- 45 с. 7. Saevardsdottir G. A., Larsen H. L., Bakken J. A. High-power ac arcs in metallurgical furnaces// High Temp. Material Processes, 2001. vol. 5, №1, p.21-43. 8. Сисоян Г. А. Электрическая дуга в электрической печи. -М.: Металлургия, 1974.-304 с. 9. Кулинич В. И., Головачев Н. П., Суслов А. В., Привалов О. Е. Репродукция электрического режима выплавки углеродистого феррохрома по составляющим активного сопротивления ванны//Сталь 2007 г. №7 с.-41-46. 10. Миронов Ю. М., Ильгачев А. Н., Крайнов И. Б. Особенности электрических режимов мощных фосфорных печей.//Электричество 1998 г, №7 с. 52-55. 11. Кухарев А. Л., Кохан П. Г., Недвига Л. А. Коммутационные процессы в реакторных устройствах РПН электropечных трансформаторов//Техническая электродинамика, 2006. № 5. с. 38-43.

Поступила в редколлегию 04.04.07